

## مکان‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و کلیدهای جداکننده برای کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان در شبکه توزیع با امکان عملکرد جزیره‌ای و بار متغیر با زمان توسط الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

مجید شهابی<sup>۱</sup>، مصطفی رضایی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی

نوشیروانی بابل- بابل- ایران

Shahabi.m@nit.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد برق- قدرت، مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی و غیر انتفاعی هدف- ساری- ایران

mostafa.r022@yahoo.com

**چکیده:** استفاده همزمان از کلیدهای جداکننده و منابع تولید پراکنده، می‌تواند تأثیر درخور توجهی در بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع داشته باشد. همچنین، بهره‌برداری از این نوع منابع در شبکه توزیع، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات بالای سیستم توزیع ایفا کند. در این مقاله، روشی به منظور جایابی همزمان این تجهیزات برای رسیدن به اهداف کاهش تلفات توان و بهبود قابلیت اطمینان سیستم با در نظر گرفتن قیود فنی شبکه ارایه می‌شود. در این راستا، تابع هدف پیشنهادی مبتنی بر سود و هزینه، شامل هزینه نصب و نگهداری و منافع ناشی از این تجهیزات، معرفی شده‌است. همچنین، در طرح پیشنهادی، جنبه تغییرپذیری میزان بارهای شبکه با زمان نیز لحاظ شده‌است. برای حل مسأله مکان‌یابی مورد نظر از الگوریتم ژنتیکی استفاده شده که با معرفی عملگرهای تکمیلی و جدید در همگرایی آن تسریع شده‌است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بهبود یافته بر روی شبکه آزمایش ۳۳ شینه استاندارد IEEE، کاربردی بودن و کارایی این روش و تأثیر استفاده از مدل بار دقیق‌تر را نمایان می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک بهبودیافته، بار چند سطحی، تولید پراکنده، جایابی، کلیدهای جداکننده.

### ۱- مقدمه

شبکه قدرت در خور توجه است. با به‌کار بردن تجهیزات کلیدزنی نظیر سکسیونرها<sup>۱</sup>، بریکرها<sup>۲</sup> و کلیدهای بازبست<sup>۳</sup> به همراه منابع تولید پراکنده<sup>۴</sup> (DG)، می‌توان زمان بازیابی بارهای خاموش شده را کاهش داد. در نتیجه این امر قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، حضور DG در شبکه توزیع، می‌تواند به کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ کمک کند. با توجه به بالا بودن هزینه این تجهیزات، باید با مکان‌یابی مناسب، میزان بهره‌مندی از مزایای آن‌ها را به حداکثر رساند [۳].

قابلیت اطمینان سیستم قدرت مسأله مهمی است که توجه پژوهشگران زیادی را به سوی خود جلب کرده است. تعداد خطاها در شبکه توزیع در مقایسه با سایر بخش‌های

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۷

نام نویسنده مسئول: مجید شهابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - دانشگاه صنعتی نوشیروانی

بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

از مهم‌ترین روش‌های حل مسایل جایابی می‌توان به

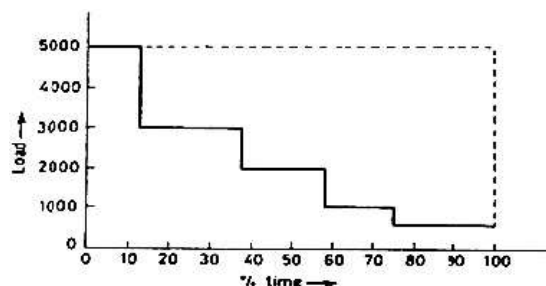
## ۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسأله

با توجه به این نکته که در تعیین تابع هدف، مدل بار به طور مستقیم تأثیرگذار است، در ابتدا مدل بار تشریح می‌شود. پس از آن به بیان تابع هدف پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- مدل بار متغیر با زمان

این مدل بار از منحنی تداومی بار<sup>۷</sup> به دست می‌آید. در طرح پیشنهادی، بار شبکه در هر سال به چند سطح تخمین زده می‌شود. برای تخمین بار سالیانه شبکه به چند سطح، از ضرایب توزیع بار استفاده می‌شود. این ضرایب در واقع، نسبت بار هر پله تخمینی به پیک بار شبکه را نشان می‌دهد. در شکل (۱) یک مدل بار چند سطحی با تقریب منحنی تداومی بار به پنج سطح نشان داده شده است.

شاخص‌های تابع هدف با در نظر گرفتن مدل بار چندسطحی برای هر نقطه بار دقیق‌تر محاسبه می‌شود. علاوه بر این، این امکان وجود دارد که در شرایطی، منابع تولید پراکنده نتوانند بار پیک جزیره را تأمین کنند، ولی قادر به تأمین بار جزیره در بخش اعظم سال و در سطوح پایین‌تر بار باشند.



شکل (۱): مدل بار چند سطحی با پنج سطح

### ۲-۲- تابع هدف

تابع هدف پیشنهادی برای مسأله جایابی همزمان DG و کلیدها، به شکل کمینه‌سازی تفاضل هزینه‌ها و منافع تعریف می‌شود. در بخش هزینه‌ها، هزینه خرید و نصب تجهیزات و همچنین، هزینه مربوط به نگهداری و بهره‌برداری از آن‌ها لحاظ می‌شود. در بخش منافع، درآمد تولید توان DG‌ها در کنار منافع حاصل از کاهش تلفات و انرژی تأمین نشده<sup>۸</sup> (ENS) در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف به شکل رابطه

روش‌های بر مبنای الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. در [۴]، مسأله مکان‌یابی بهینه چندین DG با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. از یک تابع هدف ساده برای به حداقل رساندن تلفات توان اکتیو در کنار رعایت قیود مفروض استفاده شده است. در [۲]، روشی برای جایابی بهینه DG در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات شبه تکاملی<sup>۹</sup> ارائه شده است. در [۵]، از الگوریتم اتحاد<sup>۱</sup> برای مکان‌یابی بهینه کلیدها در شبکه توزیع با حضور DG استفاده شده است. جایابی بهینه تجهیزات کلیدزنی با هدف حداقل‌سازی خاموشی مشتری و هزینه نصب کلیدها، با استفاده از الگوریتم سیستم ایمنی در [۶] انجام گرفته است.

به منظور برخورداری از دو مزیت کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان در شبکه توزیع، می‌توان همزمان از کلیدهای جداکننده و DG استفاده کرد. در این حالت DG‌ها به همراه کلیدهای جداکننده می‌توانند در هنگام وقوع عیب، با تشکیل جزایر عمدی به تأمین قسمتی از بارها اقدام کنند. در چنین شرایطی، بحث جایابی همزمان کلیدهای جداکننده و DG مطرح می‌شود. در برخی از مطالعات مکان DG‌ها ثابت در نظر گرفته شده و صرفاً جایابی کلیدها انجام گرفته است [۷]. در برخی دیگر از مطالعات مکان کلیدها ثابت در نظر گرفته شده و مکان بهینه نصب DG‌ها تعیین می‌شود [۸] و [۹]. در دسته‌ای دیگر ابتدا مکان کلیدها ثابت در نظر گرفته شده و مکان و اندازه بهینه DG‌ها تعیین می‌شود و سپس، بر مبنای جواب‌های تعیین شده برای اندازه و مکان DG‌ها، مکان بهینه کلیدها مشخص می‌شود [۱۰]. در [۱]، جایابی و ظرفیت‌یابی بهینه و همزمان منابع تولید پراکنده و ادوات حفاظتی با استفاده از ترکیب الگوریتم کلونی مورچگان و تحلیل سلسله مراتبی با در نظر گرفتن مدل بار پیک انجام گرفته است.

در روش پیشنهادی مقاله حاضر، با حل مسأله جایابی کلیدهای جداکننده و DG‌ها در یک الگوریتم واحد و به‌طور همزمان، می‌توان هر دو مزیت کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان را در کنار حداقل‌سازی هزینه‌ها تأمین کرد. همچنین، جنبه تغییرپذیری میزان بارهای شبکه با زمان با در نظر گرفتن مدل بار چند سطحی لحاظ می‌شود.

به منظور محاسبه مقدار ENS از روشی بر پایه مد خطا و تحلیل اثر آن استفاده می‌شود. در ابتدا هر یک از مدهای خطا که در اینجا تنها عیب خطوط است، به شکل جداگانه در نظر گرفته می‌شود. برای وقوع عیب در هر یک از خطوط مقدار ENS با لحاظ تأثیر ساختار شبکه، وجود بریکر، فیوزها و سکسیونرها، همچنین، امکان تغذیه بارهای خاموش شده از منبع اصلی یا دیگر منابع، محاسبه می‌شود. در نهایت، با جمع کردن این مقادیر، ENS کل سیستم به دست می‌آید [۱۱]. در دو حالت با حضور کلیدها و DGها و در غیاب این تجهیزات، هزینه ENS محاسبه می‌شود. در نهایت، مقدار تفاوت این هزینه‌ها برابر با منافع مربوط به کاهش این شاخص است. بدین ترتیب منافع حاصل از کاهش ENS با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Benefit_{ENS} = \sum_{k=1}^{N_{LL}} Cost_{ENS}^k \times (ENS_{base}^k - ENS^k) \quad (6)$$

که در آن،  $Cost_{ENS}^k$  هزینه انرژی تأمین نشده (ENS) در سطح بار k ام،  $ENS_{base}^k$  مقدار ENS در سطح بار k ام و بدون حضور DGها و کلیدها و  $ENS^k$  مقدار ENS در سطح بار k ام و در حضور DGها و کلیدهاست.

ضرایب اقتصادی به منظور محاسبه ارزش فعلی تجمعی<sup>۹</sup> هزینه‌ها و منافع سالانه استفاده می‌شود. ضرایب EF1 و EF2 با روابط (۷) تا (۱۰) داده می‌شود [۱۲].

$$EF1 = \frac{1 - (i_1)^{EL}}{1 - i_1} \quad (7)$$

$$i_1 = \frac{1}{1 + i} = \frac{1 + i_{inf}}{1 + i_{int}} \quad (8)$$

$$EF2 = \frac{1 - (i_2)^{EL}}{1 - i_2} \quad (9)$$

$$i_2 = \frac{1 + LG}{1 + i} = \frac{(1 + i_{inf}) \times (1 + LG)}{1 + i_{int}} \quad (10)$$

که در آن،  $i$  نرخ بهره واقعی،  $i_{inf}$  نرخ تورم سالیانه،  $i_{int}$  نرخ بهره اسمی،  $EL$  طول دوره مطالعه و  $LG$  نرخ رشد بار سالیانه است.

(۱) ارایه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Minimize Obj. Fun.} &= \text{Costs} - \text{Benefits} \\ &= [f_{instal} + (f_{M\&O} \times EF1)] - [(f_{Gen_{DG}} \times EF1) \\ &\quad + (\text{Benefit}_{ENS} + \text{Benefit}_{loss}) \times EF2] \end{aligned} \quad (1)$$

در ادامه، بخش‌های مختلف تابع هدف به تفکیک بیان می‌شوند.

۱- هزینه خرید و نصب

$$f_{instal} = \sum_{i=1}^{N_{DG}} Cost_{instal\_DG}^i + \sum_{i=1}^{N_S} Cost_{instal\_S}^i \quad (2)$$

که در آن،  $N_{DG}$  و  $N_S$  به ترتیب تعداد DGها و تعداد کلیدها هستند.  $Cost_{instal\_DG}^i$  و  $Cost_{instal\_S}^i$  به ترتیب هزینه‌های مربوط به خرید و نصب DG و کلید i ام می‌باشند.

۲- هزینه نگهداری و بهره‌برداری

$$f_{M\&O} = \sum_{i=1}^{N_{DG}} Cost_{M\&O\_DG}^i + \sum_{i=1}^{N_S} Cost_{M\&O\_S}^i \quad (3)$$

که در آن،  $Cost_{M\&O\_S}^i$  و  $Cost_{M\&O\_DG}^i$  هزینه متوسط سالانه نگهداری و بهره‌برداری از DG و کلید i ام هستند.

۳- منافع حاصل از تولید توان منابع تولید پراکنده

$$f_{Gen_{DG}} = \sum_{k=1}^{N_{LL}} (Cost_E^k \times \sum_{i=1}^{N_{DG}} E_{Gen\_DG_i}^k) \quad (4)$$

که در آن،  $N_{LL}$  تعداد سطوح بار،  $Cost_E^k$  و  $E_{Gen\_DG_i}^k$  به ترتیب قیمت انرژی الکتریکی در سطح بار k ام و مقدار متوسط انرژی تولیدی DG i ام در سطح بار k ام است.

۴- منافع حاصل از کاهش تلفات شبکه

$$Benefit_{loss} = \sum_{k=1}^{N_{LL}} Cost_E^k \times (E_{loss\_base}^k - E_{loss}^k) \quad (5)$$

که در آن،  $E_{loss\_base}^k$  انرژی اتلافی سیستم در سطح بار k ام و بدون حضور DGها،  $E_{loss}^k$  انرژی اتلافی سیستم در سطح بار k ام و در حضور DGهاست.

۵- منافع حاصل از کاهش انرژی تأمین نشده

### ۲-۳- قیود

در کنار تابع هدف، قیودی هم در نظر گرفته می‌شود که جواب نهایی نباید ناقض آن‌ها باشد. این قیود عبارتند از:

• قید ولتاژ شین‌ها

$$V_{\min} \leq V_i^k \leq V_{\max} \quad (11)$$

که در آن،  $V_i^k$  ولتاژ شین  $i$  ام در سطح بار  $k$  ام،  $V_{\min}$  و  $V_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز شین‌ها هستند.

• قید جریان خطوط

$$I_i^k \leq I_{\max}^i \quad (12)$$

در این رابطه  $I_i^k$  جریان شاخه  $i$  ام در سطح بار  $k$  ام و  $I_{\max}^i$  حداکثر جریان مجاز شاخه  $i$  ام است.

• قید توان تولیدی DGها

$$P_{\min}^i \leq P_{DG}^i \leq P_{\max}^i \quad (13)$$

$$Q_{\min}^i \leq Q_{DG}^i \leq Q_{\max}^i \quad (14)$$

$$pf_{\min}^i \leq pf_{DG}^i \leq pf_{\max}^i \quad (15)$$

در این رابطه  $P_{DG}^i$  و  $Q_{DG}^i$  و  $pf_{DG}^i$  به ترتیب توان

اکتیو، توان راکتیو و ضریب توان  $i$  امین DG هستند.  $P_{\max}^i$

و  $P_{\min}^i$  به ترتیب حداکثر و حداقل توان اکتیو  $i$  امین DG

می‌باشند. همچنین،  $Q_{\max}^i$  و  $Q_{\min}^i$  به ترتیب حداکثر و

حداقل توان راکتیو  $i$  امین DG هستند.  $pf_{\max}^i$  و  $pf_{\min}^i$

به ترتیب حداکثر و حداقل ضریب توان  $i$  امین DG

می‌باشند.

• قید ضریب نفوذ DG

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG_i} \leq K_p \times \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_{L_i} \quad (16)$$

که در آن،  $P_{DG_i}$  توان اکتیو تولیدی DG  $i$  ام،  $P_{L_i}$

توان اکتیو در نقطه بار  $i$  ام،  $N_{bus}$  تعداد شین‌های شبکه و

$K_p$  حداکثر ضریب نفوذ مجاز DG است.

استفاده شده‌است. الگوریتم ژنتیک بر مبنای ایده تکامل داروینی و انتخاب طبیعی مطرح شده‌است. این الگوریتم روش بسیار خوبی برای حل مسائل بهینه‌سازی محسوب می‌شود. یکی از علت‌های برتری این الگوریتم این است که برخلاف بیشتر روش‌های بهینه‌سازی، همانند برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی که الگوریتم‌های تک مسیره هستند، عمل جستجو را از چند نقطه شروع کرده و به سمت پاسخ بهینه حرکت می‌کند. از این رو در حل مسائل پیچیده بسیار مناسب است. در روش پیشنهادی برای حل مسأله جایابی از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته که این بهبود توسط عملگرهای تکمیلی پیشنهادی بوده، استفاده شده‌است. در ادامه شرح کامل آن آمده است.

### ۳-۱- کدگذاری مسأله (تعریف کروموزوم)

کروموزوم پیشنهادی متشکل از دو رشته است. در رشته اول که مربوط به مکان نصب کلیدهاست، به تعداد مکان کاندید برای نصب کلیدها اعداد صفر و یک به طور تصادفی تولید می‌شود. به بیانی دیگر، این رشته به شکل دودویی کدگذاری می‌شود. در رشته دوم اگر فرض شود جایابی برای سه نوع DG با اندازه‌های مختلف انجام می‌شود، به تعداد مکان کاندید برای نصب DGها، به شکل تصادفی اعداد صفر، یک، دو و سه تولید می‌شود. همچنین، برای یک منبع DG با سه سطح تولید مختلف باز هم می‌توان به همین شکل کدگذاری مسأله را انجام داد. این رشته با اعداد صحیح کدگذاری می‌شود. بدین ترتیب با کنار هم قرار گرفتن رشته‌های اول و دوم، کروموزوم‌های جمعیت اولیه ایجاد می‌شود. شکل (۲) ساختار کروموزوم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

به تعداد مکان کاندید کلیدها				به تعداد مکان کاندید DGها			
۰.۱	۰.۱	۰.۱	-	۰.۱	۰.۱,۲,۳	۰.۱,۲,۳	۰.۱,۲,۳

شکل (۲): ساختار کروموزوم پیشنهادی

### ۳-۲- تابع برازندگی

در طی اجرای الگوریتم، تابع برازندگی برای همه کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود. مقدار محاسبه شده نشان‌دهنده

### ۳- روش بهینه‌سازی

در این مقاله، از روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای

حل مسأله مکان‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و کلیدها

$CV_T$  و  $CP_T$  به ترتیب میزان تخطی از قیود جریان، ولتاژ و ضریب نفوذ DG است.

### ۳-۳- انتخاب

برای انتخاب والدین برای تولید نسل جدید از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این مقاله، برای این منظور از روش چرخ رولت<sup>۱</sup> استفاده شده است. علاوه بر این، در هر تکرار تعدادی از بهترین عضوهای هر نسل بدون تغییر به نسل بعد انتقال می‌یابند.

### ۳-۴- عملگر تقاطع

در روش پیشنهادی، عملگرهای تقاطع متفاوتی برای هر کدام از رشته‌های اول و دوم استفاده می‌شود. به منظور شرح نحوه اعمال عملگر تقاطع برای رشته اول، فرض می‌شود شبکه‌ای با یک شاخه اصلی و چهار شاخه فرعی موجود است. در این صورت، رشته اول به نواحی مشخصی شامل مکان کاندید برای نصب کلید روی شاخه اصلی، شاخه فرعی اول، شاخه فرعی دوم، شاخه فرعی سوم و شاخه فرعی چهارم تقسیم‌بندی می‌شود. عملگر تقاطع در این رشته از چهار نقطه شکست که همان نقاط بین این نواحی می‌باشند، انجام می‌شود. ابتدا یک عدد تصادفی ایجاد می‌شود. این عدد تصادفی نوع تقاطع شامل تقاطع تک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای را مشخص می‌سازد. سپس، همین نوع تقاطع به طور تصادفی از نقاط شکست مفروض اعمال می‌شود. در شکل (۳) نحوه اعمال عملگر تقاطع چهار نقطه‌ای در رشته اول نشان داده شده است.

در رشته دوم هم از عملگر تقاطع چند نقطه‌ای استفاده می‌شود. با این تفاوت که در آن تعدادی از ژن‌های والدین که عدد تصادفی تولیدی برای آن‌ها از احتمال تقاطع کمتر است، با یکدیگر تعویض می‌شوند.

شایستگی هر یک از کروموزوم‌هاست. احتمال حضور کروموزوم‌های شایسته‌تر برای تولید نسل بعدی بیشتر است. با توجه به این که در این مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی تابع هدف دنبال می‌شود، معکوس مجموع تابع هدف و هزینه جریمه به عنوان تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته می‌شود. تابع برازندگی به شکل زیر پیشنهاد می‌شود.

$$F_{fitness} = (Obj.Fun. + C_{penalty})^{-1} \quad (17)$$

که در آن،  $Obj. Fun.$  مقدار تابع هدف و  $C_{penalty}$  میزان جریمه برای تخطی از قیود مسأله است.

محاسبه میزان جریمه تخطی از قیود به این صورت است که در هر تکرار الگوریتم، برای همه کروموزوم‌ها، قیود مسأله بررسی می‌شود. در صورتی که یکی از کروموزوم‌ها این قیود را نقض کند، جریمه‌ای برای آن در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۸) مقدار تخطی از قید  $i$ ام ( $C_i$ ) قابل محاسبه است.

$$CV_i = \begin{cases} \frac{C_i^{\min} - C_i}{C_i^{\min}} & \text{for } C_i \leq C_i^{\min} \\ 0 & \text{for } C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\max} \\ \frac{C_i - C_i^{\max}}{C_i^{\max}} & \text{for } C_i \geq C_i^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

در نهایت، مقدار کل تخطی از قیود عبارت خواهد بود از:

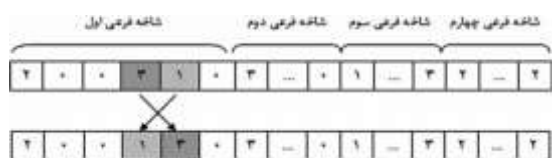
$$CV = \sum_i K_i CV_i \quad (19)$$

با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)، می‌توان مقدار تخطی از قیود ولتاژ، جریان و ضریب نفوذ مجاز DGها را به دست آورد. مقدار جریمه‌ای که به تابع هزینه افزوده می‌شود، مطابق با رابطه (۲۰) است.

$$C_{penalty} = K_I \times CI_T + K_V \times CV_T + K_P \times CP_T \quad (20)$$

که در آن،  $K_I$ ،  $K_V$  و  $K_P$  به ترتیب ضریب جریمه برای تخطی از قید جریان، ولتاژ و ضریب نفوذ DG؛ و  $CI_T$

جهش، ابتدا رشته دوم به چند ناحیه تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای است که هر ناحیه، شامل مکان‌های کاندید نصب DG روی یکی از شاخه‌های اصلی یا فرعی شبکه می‌شود. نحوه اعمال این نوع جهش در هر ناحیه به این شکل است که دو عدد از ژن‌های موجود در یک ناحیه به طور تصادفی انتخاب شده و سپس، مکان این ژن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شوند. البته واضح است که در این حالت ژن‌ها باز هم در همان ناحیه باقی می‌مانند. در شکل (۴) نحوه اعمال این عملگر نشان داده شده است.



شکل (۴): نحوه اعمال جهش جابجایی ناحیه‌ای بر روی مکان

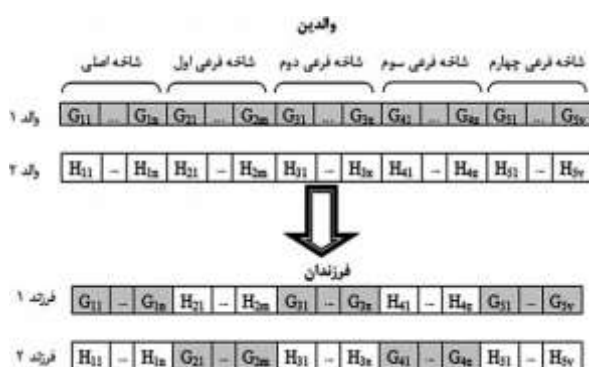
**ها DG**

ب) جابجایی سراسری: در این نوع عملگر جهش، دو عدد از ژن‌های رشته دوم به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. سپس، مکان این ژن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شود. در این مورد دیگر هیچ‌گونه ناحیه‌بندی وجود ندارد و این ژن‌های انتخابی، از سراسر رشته دوم قابل انتخاب هستند.

۵) جهش به شکل جابجایی مکان کلید: برای اعمال این نوع عملگر جهش، ابتدا رشته اول به چند ناحیه تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای است که هر ناحیه، شامل مکان‌های کاندید نصب کلیدها روی یکی از شاخه‌های اصلی یا فرعی شبکه می‌شود. نحوه اعمال این نوع جهش در هر ناحیه به این شکل است که دو عدد از ژن‌های موجود در یک ناحیه به‌طور تصادفی انتخاب شده و سپس، مکان این ژن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شود.

**۳-۶- تولید جمعیت تصادفی**

در هر نسل، درصد کمی از جمعیت نسل جدید به تعدادی اعضای جدید اختصاص می‌یابد. این اعضای جدید به شکل کاملاً تصادفی تولید می‌شوند. با این کار الگوریتم ژنتیک علاوه‌بر جستجویی که در مسیرهای موازی مختلف



شکل (۳): نحوه اجرای عملگر تقاطع چهار نقطه‌ای در رشته اول

**۳-۵- عملگر جهش**

مهم‌ترین وظیفه این عملگر اجتناب از همگرایی به جواب بهینه محلی است. در روش پیشنهادی برای حل مسأله جایابی همزمان DGها و کلید، از عملگرهای جهش متعددی استفاده می‌شود. استفاده از این عملگرهای تکمیلی به علت پیچیدگی‌های خاص مسأله است. این پیچیدگی‌ها بیشتر از حل همزمان مسأله جایابی DG و کلید در یک الگوریتم واحد ناشی می‌شود. در ادامه انواع عملگرهای جهش پیشنهادی مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک شرح داده می‌شود.

۱) جهش در وضعیت نصب کلید: در این نوع عملگر جهش، یکی از ژن‌های رشته اول به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس، در صورتی که مقدار این ژن برابر یک باشد، مقدار آن به صفر تغییر می‌یابد و اگر مقدار آن برابر صفر باشد، مقدار آن به یک تغییر می‌کند.

۲) جهش در نوع DG: در این نوع عملگر جهش، یکی از ژن‌های رشته دوم به طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس، مقدار این ژن، به مقداری تصادفی که غیر از مقدار فعلی آن است، تغییر می‌کند.

۳) جهش به مقدار صفر: این عملگر به هر دو رشته به طور مجزا اعمال می‌شود. نحوه اجرای آن به این شکل است که یک ژن به طور تصادفی انتخاب شده و سپس مقدار آن، به مقدار صفر تغییر می‌یابد.

۴) جهش به شکل جابجایی مکان DG: این عملگر در دو مرحله انجام می‌شود که به شکل زیر می‌باشند.

الف) جابجایی ناحیه‌ای: برای اعمال این نوع عملگر

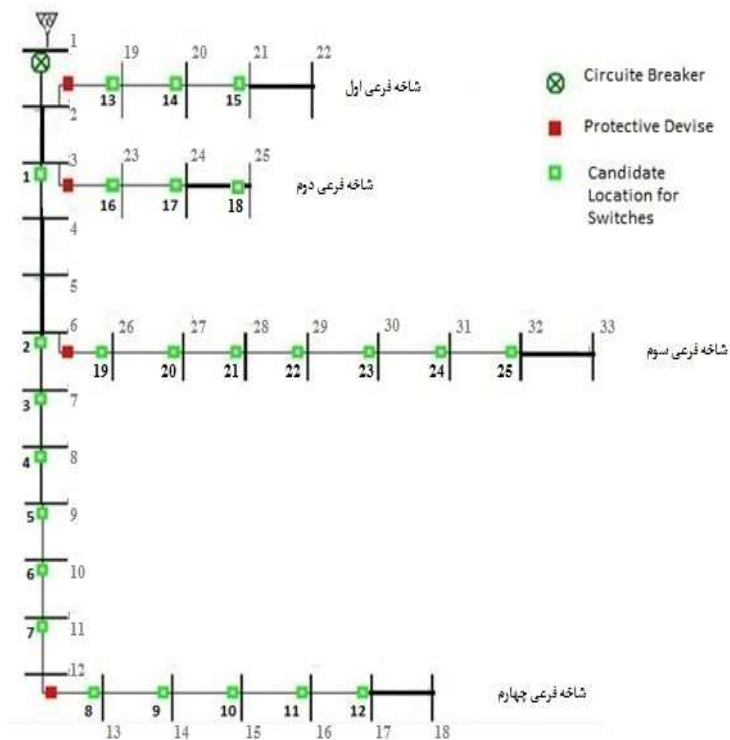
#### ۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه آزمایش ۳۳ شینه

برای بررسی کارایی روش ارایه شده از شبکه آزمایش ۳۳ شینه شعاعی استفاده شده است. اطلاعات این شبکه آزمایش در [۱۳] آورده شده است. همچنین، اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی قابلیت اطمینان در قسمت پیوست (جدول (۱۱)) ارایه شده است. شبکه مورد مطالعه به همراه مکان‌های کاندید نصب کلیدها در شکل (۵) نشان داده شده است. مکان‌های کاندید برای نصب DG هادر شین‌های روی شاخه‌های فرعی تعیین شده است.

انجام می‌دهد، مکان‌های تصادفی موجود در فضای مسأله را نیز جستجو می‌کند.

#### ۳-۷- شرط خاتمه

برای تعیین این که چه زمانی تکرار الگوریتم ژنتیک متوقف شود، روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، شرط خاتمه به این شکل است که اگر بعد از رسیدن به یک حداکثر تکرار مشخص، در طی تعداد نسل‌های متوالی معینی تغییری در بهترین مقدار به دست آمده برای تابع برازندگی به وجود نیاید، الگوریتم همگرا شده و پایان می‌یابد.



شکل (۵): سیستم آزمایش ۳۳ شینه شعاعی

اعداد ثابتی فرض شده و از جمله ورودی‌های مسأله به حساب می‌آیند که در جدول (۲) مقادیر آن‌ها ارایه شده است. دسته دیگری از هزینه‌ها شامل قیمت انرژی و ENS در هر پله بار است که این هزینه‌ها نیز در جدول (۳) قابل مشاهده هستند [۱۲].

هزینه نصب و نگهداری کلیدهایی که به عنوان جداکننده خطا به کار می‌روند، به ترتیب ۱۸۰۰۰ دلار و ۲۰۰۰ دلار در سال در نظر گرفته شده است. همچنین، هزینه‌های مربوط به انواع DG در جدول (۱) ارایه شده است [۸].

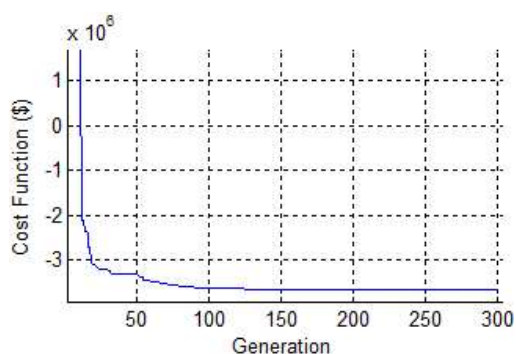
در این مقاله، ضرایب بار برای سطوح مختلف، به شکل

در حالت عادی عملکرد شبکه، DGهای با قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید<sup>۱۱</sup> به شکل شین PV مدل‌سازی می‌شوند. در صورتی که این DGها قادر به کنترل ولتاژ شین متصل به خود نباشد، به شکل شین PQ مدل‌سازی می‌شوند. نوع دیگری از منابع که جایابی آنها در کنار این نوع DGها بررسی می‌شود، DGهایی هستند که قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید ندارند. این نوع منابع به شکل شین PQ و در ضریب توان واحد بهره‌برداری می‌شوند.

طرح پیشنهادی برای جایابی همزمان DG و کلیدهای جداکننده در قالب سه مورد مطالعاتی بررسی می‌شود. در همه این موارد مطالعاتی، جایابی همزمان DG و کلیدهای جداکننده با اهداف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان، به همراه در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری و قیود فنی شبکه انجام می‌شود. وجه تمایز این موارد مطالعاتی، چگونگی مدل‌سازی بار و قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید DGهاست.

#### ۴-۱- مورد مطالعاتی اول

در این حالت جایابی همزمان DGها و کلیدها با لحاظ کردن مدل بار پیک انجام می‌گیرد. هزینه مربوط به ENS و قیمت انرژی الکتریکی به ترتیب برابر با ۳۰۰۰ و ۷۰ دلار بر مگاوات ساعت لحاظ شده‌است. حل این مسأله جایابی توسط الگوریتم ژنتیک بهبود یافته پیشنهادی انجام شده که روند همگرایی آن در شکل (۶) نشان داده شده‌است. همچنین، نتایج این مورد مطالعاتی در جداول (۵) و (۶) و شکل (۷) ارائه شده‌است.



شکل (۶): روند همگرایی الگوریتم ژنتیک- مورد مطالعاتی اول

جدول (۱): هزینه مربوط به انواع DGها [۸]

نوع	ویژگی DG	هزینه خرید و نصب (\$)	هزینه نگهداری و بهره‌برداری (\$/yr)
۱	توربین گازی ۳۰۰ کیلووات	۱۸۲۰۳۰	۸۹۶۸۰
۲	توربین گازی ۵۰۰ کیلووات	۳۳۰۹۸۰	۱۶۳۰۶۰
۳	توربین گازی ۱ مگاوات	۵۵۱۶۴۰	۲۷۱۷۶۰

جدول (۲): مقدار و زمان تداوم برای هر سطح بار

سطح بار	مقدار ضریب	مدت زمان تداوم (h)
بار سبک	۰/۳	۲۹۲۰
بار متوسط	۰/۷	۵۵۰۰
بار پیک	۱	۳۴۰

جدول (۳): هزینه ENS [۱۲]

سطح بار	سطح بار	سطح بار	هزینه ENS (\$/MWh)
پیک	متوسط	سبک	
۳۶۰۰	۲۸۰۰	۲۰۰۰	هزینه انرژی الکتریکی (\$/MWh)
۷۰	۴۹	۳۵	

طول دوره مطالعه ۱۰ سال است. رشد بار سالیانه ۵ درصد و مقدار ماکزیمم ضریب نفوذ مجاز DG، ۳۵ درصد در نظر گرفته شده‌است. همچنین، مقادیر تنظیمی مربوط به شاخص‌های الگوریتم ژنتیک بهبود یافته پیشنهادی در جدول (۴) ارائه شده‌است.

جدول (۴): مقادیر شاخص‌های الگوریتم ژنتیک.

مقدار	عنوان شاخص
۱۰۰	جمعیت
۰/۸۵	احتمال تقاطع در کلیدها
۰/۷	احتمال تقاطع در DGها
۰/۱	احتمال جهش کلیدها
۰/۰۲	احتمال جهش در نوع DGها
۰/۱	احتمال جهش به صفر
۰/۲	احتمال جهش سراسری در مکان DGها
۰/۱	احتمال جهش ناحیه‌ای در مکان DGها
۰/۱	احتمال جهش ناحیه‌ای در مکان کلیدها

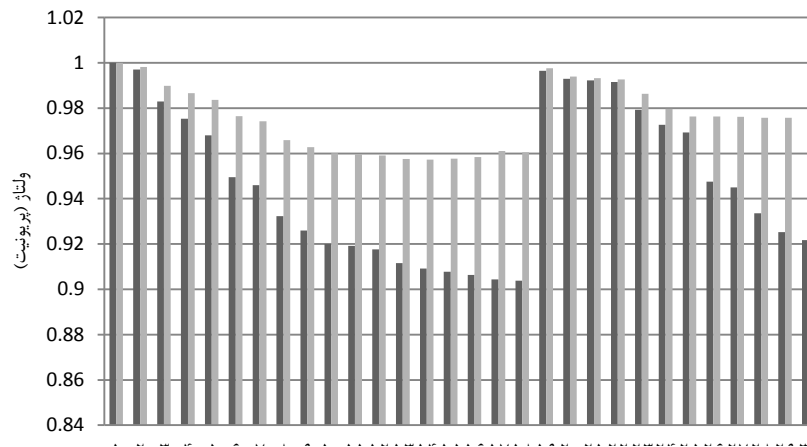


جدول (۶): مقایسه حالت قبل و بعد از جایابی برای مورد

مطالعاتی اول		
حالت بهینه	حالت مینا	
۸۶۰/۴۷۹۵	۱۸۴۸/۴	تلفات (MWh/yr)
۶۱/۶۷۹۵	۱۴۵/۸۸۱	ENS (MWh/yr)
-۳/۶۵۸	۰	تابع هدف (million\$)

جدول (۵): نتایج مکان‌یابی بهینه برای مورد مطالعاتی اول

نام تجهیز	مکان بهینه	نوع DG
DG	۱۷	۱ (۳۰۰ کیلوواتی)
	۳۱	۳ (۱ مگاواتی)
کلید	۱، ۲، ۲۴	-

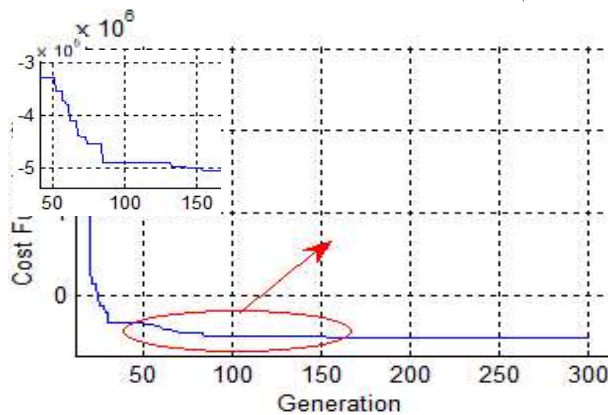


شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه بازای سطح بار بیک و در سال اول مطالعه- مورد مطالعاتی اول

#### ۴-۲- مورد مطالعاتی دوم

در این حالت جایابی همزمان DG و کلید با در نظر گرفتن مدل بار سه سطحی انجام گرفته است. برای هزینه‌های مربوط به ENS از اطلاعات جدول (۳) استفاده شده است. فرض می‌شود DGها دارای قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید باشند. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل (۸) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی، مشاهده می‌شود که یک DG یک مگاواتی روی شین ۳۱ قرار می‌گیرد. این DG به همراه کلید روی مکان کاندید ۲۴ قادر است بارهای روی شین‌های ۳۱ تا ۳۳ را در سطح بار بیک پشتیبانی کند. همچنین، یک DG ۳۰۰ کیلوواتی روی شاخه فرعی چهارم قرار می‌گیرد که حضور آن به کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه منجر می‌شود. کلیدهای روی مکان‌های کاندید ۱ و ۲، با جداسازی ناحیه عیب پایین‌دستی امکان اتصال مجدد بارهای بالادستی به شبکه اصلی را فراهم می‌سازند.



شکل (۸): روند همگرایی الگوریتم ژنتیک- مورد مطالعاتی دوم

جدول (۷): نتایج مکان‌یابی بهینه برای مورد مطالعاتی دوم

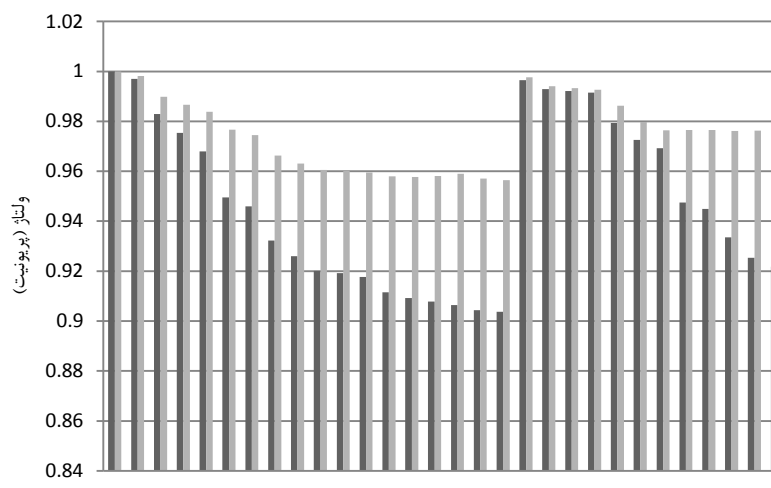
نام تجهیز	مکان بهینه	نوع DG
DG	۱۶	۱ (۳۰۰ کیلوواتی)
	۳۱	۳ (۱ مگاواتی)
کلید	۱، ۱۹، ۲۲، ۲۴	-

جدول (۸): مقایسه حالت قبل و بعد از جایابی برای مورد

## مطالعاتی دوم

حالت مینا	حالت بهینه	
۶۶۳/۵۴۲۱	۲۴۷/۰۲۷۵	تلفات (MWh/yr)
۸۴/۳۶۴۴	۲۸/۹۷۸۸	ENS (MWh/yr)
۰	-۵۰۶۸۷۰	تابع هدف (\$)

تفاوت اصلی که در این مورد نسبت به مورد اول وجود دارد در شرط تشکیل جزایر است. در حالت قبل برای بررسی امکان تشکیل یک جزیره، توانایی DG در تأمین بار پیک آن جزیره مد نظر قرار می‌گرفت؛ ولی در این حالت با توجه به اینکه در بخش بیشتر سال، مقدار بار در سطوح سبک و متوسط است، امکان دارد جزایر متفاوتی برای حالت عملکرد جزیره‌ای DG در نظر گرفته شود. نتایج جایابی برای این مورد مطالعاتی در جداول (۷) و (۸) و در شکل (۹) ارائه شده‌است.



شکل (۹): پروفیل ولتاژ شبکه بازای سطح بار پیک و در سال اول مطالعه- مورد مطالعاتی دوم

## ۴-۳- مورد مطالعاتی سوم

در این قسمت جایابی همزمان DG و کلید با در نظر گرفتن مدل بار چند سطحی انجام گرفته است. شرایط این حالت همان شرایط بیان شده در مورد مطالعاتی دوم است. تنها تفاوت این مورد مربوط به قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید DGهاست. در اینجا فرض می‌شود که یکی از DGها با ظرفیت تولید نامی ۳۰۰ کیلووات، قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید را ندارد.

در حالت عملکرد جزیره‌ای، DGها باید قادر به تنظیم توان خروجی متناسب با میزان بار جزیره باشند. بنابراین،

در حالت قبل یک DG یک مگاواتی و یک کلید، جزیره‌ای شامل بارهای روی شین‌های ۳۱، ۳۲ و ۳۳ تشکیل می‌دادند. ولی در این حالت یک DG یک مگاواتی با سه عدد کلید قادرند جزایر متعددی تشکیل دهند. همچنین، حضور یک DG ۳۰۰ کیلوواتی روی شاخه جانبی چهارم، سبب کاهش تلفات و جریان افت ولتاژ زیاد شین‌های روی این شاخه می‌شود.

نکته مهم در این مورد آن است که منافع تأمین بارهای جزایر در سطوح بار متوسط و سبک به اندازه‌ای می‌باشد که استفاده از کلیدهای بیشتر را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند.

فرض می‌شود DG‌هایی که قابلیت دریافت دستور برای تغییر بار را ندارند، در تشکیل جزایر عمدی شرکت نمی‌کنند. حضور این DG‌ها در شبکه، می‌تواند به کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه کمک کند. در شکل (۱۰)

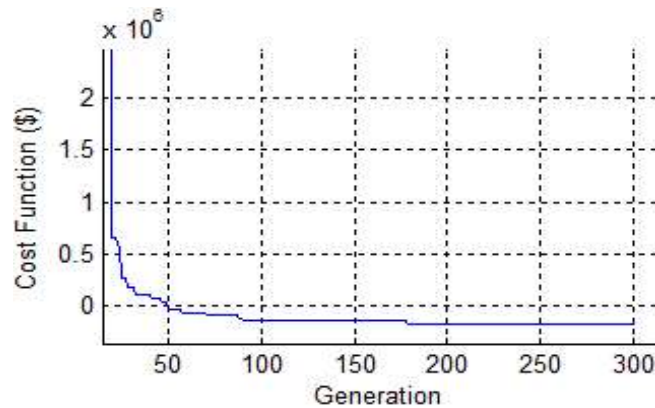
روند همگرایی الگوریتم ژنتیک برای این مورد مطالعاتی نشان داده شده‌است. همچنین، نتایج این مورد در جداول (۹) و (۱۰) و شکل (۱۱) ارائه شده‌است.

جدول (۹): نتایج مکان‌یابی بهینه برای مورد مطالعاتی سوم

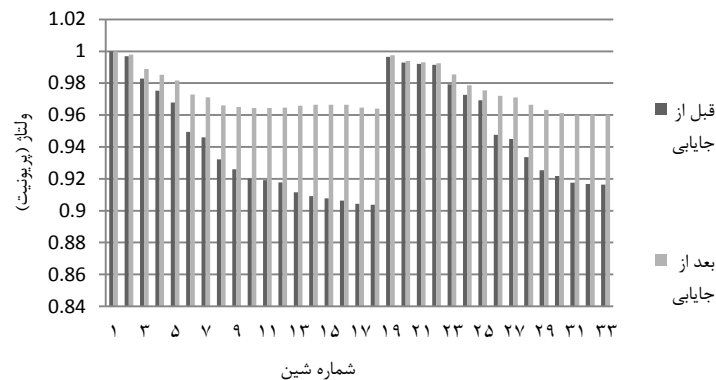
نام تجهیز	مکان بهینه	نوع DG
DG	۱۴	۱ (۳۰۰ کیلوواتی) - Dispatchable
	۱۶	۱ (۳۰۰ کیلوواتی) - Non-Dispatchable
	۲۹	۱ (۳۰۰ کیلوواتی) - Dispatchable
	۳۳	۱ (۳۰۰ کیلوواتی) - Dispatchable
کلید	۱، ۲، ۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۴	-

جدول (۱۰): مقایسه حالت قبل و بعد از جایابی برای مورد مطالعاتی سوم

حالت مینا	حالت بهینه	
۶۶۳/۵۴۲۱	۲۵۶/۷۵۰۲	تلفات (MWh/yr)
۸۴/۳۶۴۴	۳۱/۹۸۶۲	ENS (MWh/yr)
۰	-۱۶۰۶۶۰	تابع هدف (\$)



شکل (۱۰): روند همگرایی الگوریتم ژنتیک - مورد مطالعاتی سوم



شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ شبکه بازای سطح بار پیک و در سال اول مطالعه - مورد مطالعاتی سوم

## پوست

اطلاعات خطوط شبکه آزمایش ۳۳ شینه به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان در جدول (۱۱) آورده شده است.

جدول (۱۱): اطلاعات خطوط شبکه ۳۳ شینه

شین فرستنده	شین گیرنده	$\lambda$	r	شین فرستنده	شین گیرنده	$\lambda$	r
۱	۲	۰,۶	۶	۱۷	۱۸	۰,۶	۳
۲	۳	۰,۶	۶	۲	۱۹	۰,۶	۶
۳	۴	۰,۶	۳	۱۹	۲۰	۰,۶	۶
۴	۵	۰,۶	۳	۲۰	۲۱	۰,۶	۶
۵	۶	۰,۶	۳	۲۱	۲۲	۰,۶	۶
۶	۷	۰,۶	۳	۳	۲۳	۰,۶	۶
۷	۸	۰,۶	۳	۲۳	۲۴	۰,۶	۶
۸	۹	۰,۶	۳	۲۴	۲۵	۰,۶	۶
۹	۱۰	۰,۶	۳	۶	۲۶	۰,۶	۶
۱۰	۱۱	۰,۶	۳	۲۶	۲۷	۰,۶	۶
۱۱	۱۲	۰,۶	۳	۲۷	۲۸	۰,۶	۶
۱۲	۱۳	۰,۶	۳	۲۸	۲۹	۰,۶	۶
۱۳	۱۴	۰,۶	۳	۲۹	۳۰	۰,۶	۶
۱۴	۱۵	۰,۶	۳	۳۰	۳۱	۰,۶	۶
۱۵	۱۶	۰,۶	۳	۳۱	۳۲	۰,۶	۶
۱۶	۱۷	۰,۶	۳	۳۲	۳۳	۰,۶	۶

## مراجع

- [1] Jafari, M., Monsef, H., "Optimal placement and sizing of DGs and protective devices using ACS and AHP", 25<sup>th</sup> Power System Conf. (PSC), Tehran, Niroo Research Institute, 1389.
- [2] Akhavan-Niaki, M., Golkar, M. A., "Optimal DG allocation for loss reduction and voltage profile improvement using CPSO method", 24<sup>th</sup> Power System Conf. (PSC), Tehran, Niroo Research Institute, 1388.
- [3] Moradi, Adel, Fotuhi-Firuzabad, M., "Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 23, No.1, pp. 271-279, 2008.
- [4] Moradi, M. H., Abedinie, M., Bagheri Tolabi, H., "Optimal multi-distributed generation location and capacity by genetic algorithms", in IPEC 2010 Conference Proceedings, pp. 614-618. IEEE, 2010.
- [5] Calderaro, V, Lattarulo, V, Piccolo, A, Siano, P., "Optimal Switch Placement by Alliance Algorithm for Improving Microgrids

با توجه به نتایج مربوط به مکان بهینه DGها، دو DG ۳۰۰ کیلوواتی روی شین ۲۹ و ۳۳ تعیین شده است. با وجود این DGها و کلیدهای روی این شاخه در مواقع عیب روی خطوط یک، دو و خطوط روی این شاخه جانبی که دارای نرخ عیب متوسط بالایی هستند، با تشکیل جزایر عمده می‌توان سبب بهبود قابلیت اطمینان سیستم شد. علاوه بر این، حضور DG بر روی این شاخه فرعی، سبب کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود.

نصب DG روی شاخه جانبی چهارم می‌تواند به کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ کمک کند. مکان DG ۳۰۰ کیلوواتی که قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید را ندارد، روی شین ۱۶ تعیین شده است.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر روشی برای جایابی همزمان کلیدها و DGها در شبکه توزیع ارائه شد. در تابع هدف پیشنهادی برای این مسأله، شاخص‌های تلفات و قابلیت اطمینان لحاظ شده است. همچنین، در کنار این شاخص‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز مد نظر قرار می‌گیرد. به منظور نشان دادن اهمیت مدل‌سازی بار در تعیین جواب بهینه برای این مسأله، از مدل بار چند سطحی استفاده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه آزمایش ۳۳ شینه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن مدل‌های واقعی‌تر برای بارهای شبکه، در این مسأله تأثیرگذار است. با در نظر گرفتن مدل بار چندسطحی، DGها می‌توانند جزایر بزرگتری را در بخش عمده‌ای از سال پشتیبانی کنند. همچنین، جایابی DGهای بدون قابلیت دریافت دستور برای تغییر تولید در کنار DGهای دارای چنین قابلیت‌ای انجام گرفته است.

حل همزمان جایابی DGها و کلیدها در یک الگوریتم واحد با در نظر گرفتن چندین شاخص سبب می‌شود این مسأله دارای پیچیدگی‌های خاصی شود. در این مقاله، با اضافه کردن عملگرهای تکمیلی به الگوریتم ژنتیک و بهبود آن، کوشش شد روند همگرایی آن تسریع شده و توانایی لازم برای حل این مسأله (به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ توزیع) به دست آید.

- Asia and Pacific, pp. 1-4, 2009.
- [10] Popović, D. H, Greatbanks, J. A, Begović, M, Pregelj, A., "Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 27, no. 5 (2005): 398-408.
- [11] Billinton, R., Peng Wang, "A generalized method for distribution system reliability evaluation", in *WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing Conference Proceedings, IEEE, Vol. 2, pp. 349-354, 1995.*
- [12] Khalesi, N., Rezaei, N, Haghifam, M-R., "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 2, pp. 288-295, 2011.*
- [13] Kashem, M. A., Ganapathy, V., Jasmon, G. B., Buhari, M. I., "A novel method for loss minimization in distribution networks", in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Proceedings DRPT International Conference on IEEE, pp. 251-256, 2000.*
- Reliability", *Industrial Informatics, IEEE Transactions on, Vol.8, No.4, pp. 925,934, Nov. 2012.*
- [6] Chen, Chao-Shun, Chia-Hung Lin, Hui-Jen Chuang, Chung-Sheng Li, Ming-Yang Huang, and Chia-Wen Huang., "Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol. 21, No. 3, pp. 1209-1217, 2006.*
- [7] Mao, Yiming, and Karen N, Miu., "Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol. 18, No. 4, pp. 1346-1352, 2003.*
- [8] Teng, Jen-Hao, Tain-Syh Luor, and Yi-Hwa Liu., "Strategic distributed generator placements for service reliability improvements", in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting , Vol. 2, pp. 719-724, 2002.*
- [9] Tadayon, M., Golestani, S., "A new method for optimal RCS placement in distribution power system considering DG islanding impact on reliability", in *Transmission & Distribution Conference & Exposition IEEE:*

---

<sup>1</sup> Sectionalizer

<sup>2</sup> Breaker

<sup>3</sup> Recloser

<sup>4</sup> Distributed Generation

<sup>5</sup> Co-evolution Particle Swarm Optimization

<sup>6</sup> Alliance Algorithm

<sup>7</sup> Load Duration Curve

<sup>8</sup> Energy Not Supplied

<sup>9</sup> Cumulative Present Value

<sup>10</sup> Roulette Wheel

<sup>11</sup> Dispatchable

